Iranian Food Science and Technology Research Journal
Vol. 14, No. 4, Oct- Nov 2018, p.601-616

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
جلد 14، شماره 4، مهر- آبان 1397، ص. 616-601

بررسی پارامترهای فرآیند و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی ماهی کیلکا در حین خشک کردن کف‌پوشی

فرناز حسن‌زاده راد[1]- فخری شهیدی[2]- محبّت محبّی[2*]- محمّدرضا صلاحی[3]

تاریخ دریافت: 1395/12/03
تاریخ پذیرش: 1396/10/20

چکیده

تولید پودر ماهی کیلکا با استفاده از روش خشک کردن کف‌پوشی مورد مطالعه قرار گرفت. شرایط تولید کف بهینه از نظر مقدار پودر سفیده تخم‌مرغ (3-6 درصد) به‌عنوان عامل کف‌زا، غلظت صمغ زانتان (0/1 – 0/4 درصد) به‌عنوان پایدارکننده کف و زمان همزدن (3 -9 دقیقه) جهت ایجاد کف با کمترین مقدار دانسیته و بیشترین پایداری با استفاده از تکنیک سطح پاسخ تعیین شد. جهت ارزیابی رفتار خشک شدن کف بهینه شده، فرآیند در 3 دمای 45، 60 و 75 درجه سانتی‌گراد و در 2 ضخامت 3 و 5 میلی‌متر انجام شد. 10 مدل برای بررسی سینتیک خشک شدن کف بهینه مورد ارزیابی قرار گرفت. بر پایه آنالیزهای آماری صورت گرفته، در تمامی فرایندهای خشک کردن مدل ویبل بهترین انطباق را با داده‌های تجربی داشت. ضریب نفوذ موثر در بازه دمایی مورد مطالعه برای ضخامت 3 و 5 میلی‌متر به‌ترتیب در محدوده $7/266\times10^{-8}$ تا $1/310\times10^{-7}$ و $7/404\times10^{-8}$ تا $1/693\times10^{-7}$ متر مربع بر ثانیه با میزان انرژی فعّال‌سازی 18/201 و 25/615 کیلوژول بر مول قرار داشت. در کف‌های خشک شده با سرعت‌های بالای خشک شدن ساختار غیرمسطح و متخلخل‌تری وجود داشت. نتایج حاصل از بررسی ویژگی‌های پودر نشان داد که فعّالیت آبی و قابلیت جذب آب پودرها با افزایش دما به‌ترتیب کاهش و افزایش پیدا کردند. همچنین، پودرهای تولید شده در دمای 60 درجه سانتی‌گراد دارای L^* بالاتری بودند.

واژه‌های کلیدی: ماهی کیلکا، خشک کردن کف‌پوشی، خواص کف، ضریب نفوذ موثر رطوبت، خواص فیزیکوشیمیایی پودر

مقدمه

ماهی کیلکا از جمله منابع ارزشمند روغن ماهی و از فراوان‌ترین گونه‌های مهم شیلاتی دریای خزر به‌شمار می‌رود. گونه کیلکای دریای خزر به جنس *Clupeonella* تعلق دارد و سه گونه عمده این جنس عبارت است از کیلکای معمولی (C. *delicatula*)، آنچوی (C. *engrauliformis*) و کیلکای چشم درشت (C. *grimmi*) (Fazli *et al*., 2009). در بین این سه گونه، کیلکای معمولی از اهمیت صنعتی و اقتصادی بالاتری برخوردار می‌باشد. ماهی کیلکا با داشتن جثه کوچک خود (با وزن 7 تا 10 گرم و طول حداکثر13 سانتی‌متر) سرشار از پروتئین، ویتامین (D، E، B، A، K)، کلسیم، فسفر و اسیدهای چرب غیراشباع و امگا 3 است. بررسی‌های صورت گرفته نشان داده است که روغن ماهی کیلکای معمولی نسبت به روغن سایر ماهیان دریای خزر دارای نسبت امگا 3 به امگا 6 بیشتری است و به این ترتیب از ارزش غذایی بالاتری برخوردار می‌باشد (Pirestani *et al*., 2010). با این حال، ماهی کیلکا فسادپذیر بوده و به دلیل زمان ماندگاری نسبتاً کوتاه و عدم فراوری مناسب میزان ضایعات بالایی دارد. تلاش برای تولید فراورده‌های جدید با ویژگی‌های مطلوب، می‌تواند قدم مثبتی در جهت فرهنگ‌سازی و افزایش سرانه مصرف این منبع پروتئینی مفید در جامعه باشد. تولید پودر ماهی کیلکا می‌تواند سبب تنوع مصرف و افزایش مدت زمان ماندگاری برای این منبع پروتئینی باشد و در صنعت غذا در تولید فراورده‌های مختلفی مانند انواع اسنک‌ها و در فرمولاسیون سوپ‌ها، فراورده‌های گوشتی و نظایر آن مورد مصرف قرار گیرد.

می‌توان با استفاده از روش‌های مناسب در صنایع غذایی، ضمن کاهش زمان فراوری و بهبود شرایط انجام فرایند، محصولاتی با کیفیت بالا همراه با حفظ ویژگی‌های طبیعی ماده اولیه تولید کرد. یکی از متداول‌ترین و قدیمی‌ترین روش‌های نگهداری مواد غذایی، فرایند خشک کردن یا آب‌زدایی است.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که در سال‌های اخیر تحقیقات متعددی در دنیا پیرامون بهبود شرایط تولید و نگهداری محصولات شیلاتی

1و 2- به‌ترتیب دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، استاد و دانشجوی دکتری، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه فردوسی مشهد.
(*مسئول مکاتبات: Email: mohebbatm@gmail.com)
DOI: 10.22067/ifstrj.v14i4.62801

خشک شده صورت گرفته است. Raghunath و همکاران (1995) تغییرات بیوشیمیایی و تغذیه‌ای انواع ماهیان را طی خشک کـردن در درجه حرارت‌های 50، 60 و 70 درجه سانتی‌گراد بررسی و بهترین دما حفظ پروتئین ماهی را 60 تا 65 درجـه سـانتی‌گـراد بـرآورد نمودنـد. درویشی و همکاران (2013) خشک کردن ماهی ساردین با استفاده از مایکروویو را مورد بررسی قرار دادند و مشخص شد کـه بـا افـزایش طول موج، میزان رطوبت، سرعت خشک شدن و نیز نفوذ موثر کاهش یافت و حداقل مصرف انرژی خالص نیز در بالاترین طول موج حاصل شد. هدایتی فرد (2016) اثرات فرآیند خشک کردن حرارتـی را روی شاخص‌های حسی، شیمیایی، میکروبی و ترکیب اسیدهای چرب ماهی کپور نقره‌ای (*Hypophthalmichthys molitrix*) مورد ارزیابی قرار داد. همچنین، معینـی و جـواهری (2004) کـاربرد روش اسـمزی در خشک کردن ماهی کیلکا را بررسی کردند.

خشک کردن کف‌پوشی فرایندی است که مواد با اضـافه کـردن پایدارکننده و وارد کردن گاز/ هوا توسط همزدن به شکل کف پایـدار تبدیل شده، سپس در دمای نسبتاً پایین هوا خشک می‌شود و به شکل ورقه نازک متخلخل[1] در می‌آید. از جمله مزایای این روش می‌توان به سادگی، هزینه پایین، امکان خشک کردن نسبتاً سریع در دمای پایین و مناسب بودن برای خشک کردن مواد غـذایی حسـاس بـه حـرارت اشاره کرد. همچنین به دلیل ساختار متخلخل پودرهای حاصل، امکان جذب سریع آب و کیفیت بازسازی بالا وجـود دارد (Kadam *et al*., 2010). نکته حائز اهمیت در خشک کردن کف‌پوشـی، بهینـه‌سـازی شرایط تولید کف از نظر میزان دانسیته و پایـداری اسـت کـه ضـمن افزایش سرعت خشک کردن، امکان حفـظ سـاختار کـف را در حـین فرایند فراهم می‌نماید. خشک کردن کـف‌پوشـی بـرای محصـولات گوناگونی مورد استفاده قرار گرفته است که از آن جمله می‌تـوان بـه موارد ذیـل اشـاره کـرد: شـیر سـویا (Akintoye & Oguntunde, 1991)، اسـتارفروت[2] (Karim & Wai, 1999)، آب سـیب (Raharitsifa *et al*., 2006)، انبه (Rajkumar *et al*., 2007)، موز (Thuwapanichayanan *et al*., 2008)، آب گوجـه (Kadam & Balasubramanuan, 2011)، قارچ دکمه‌ای (پاسبان، 1391)، میگو (عزیزپور، 1391) ، پوره سیب‌زمینی (پورمهدی، 1391)، ریـز جلبـک اسپیرولینا (عطـاردی، 1393)، پنیـر (ایـزدی، 1393) و پالـپ طـالبی (صلاحی، 1394).

هدف از این پژوهش بهینه‌سازی شرایط تولید کف ماهی کیلکا با استفاده از تکنیک سطح پاسخ، بررسی و مدل‌سازی سینتیک خشـک کـردن کـف بهینـه شـده در دماهـای مختلـف و ارزیـابی خـواص فیزیکوشیمیایی پودرهای تولیدی می‌باشد.

1 Mat

2 Starfruit

مواد و روش‌ها

مواد اولیه مورد اسـتفاده در ایـن پـژوهش شـامل مـاهی کیلکـا معمولی (*C. delicatula*)، پودر سفیده تخم‌مرغ و صمغ زانتان بودند. ماهی کیلکا از شرکت پاک ثمر میرود تهیه شد. پودر سفیده تخم‌مرغ و صمغ زانتان نیز به ترتیب از شرکت گـل پـودر گلسـتان و شـرکت سیگما خریداری شدند.

آماده‌سازی صمغ

مقادیر لازم از پودر صمغ زانتان همراه با مخلـوط کـردن توسـط همزن مغناطیسی به آب مقطر اضافه شد. پس از آن محلول صمغ به مدت 24-18 ساعت جهت انجام آبپوشی کامل مولکول‌های صمغ در دمای یخچال نگهداری شد.

آماده‌سازی ماهی کیلکا

ابتدا ماهی‌ها در حالت منجمد پوست‌گیری شدند و سر و دم آنهـا جدا و محتویات شکمی خالی شـد. پـس از خـروج از حالـت انجمـاد، ماهی‌ها توسط دستگاه خردکن خانگی بـراون (MR 570، لهسـتان) به‌صورت خمیر یکنواختی در آمده و تا زمان مصرف در حالت منجمد نگهداری شدند.

آماده‌سازی نمونه‌های کف

مبنای تهیه کف برای تمام آزمایش‌ها 100 گرم بود. در ابتـدا 25 گرم خمیر ماهی کیلکا در داخل بشر 200cc توزین شد و سپس طبق طرح آزمایشی مرکب مرکزی متمرکز شـده[3] (FCCD) مقـدار مـورد نظر از پودر سفیده تخم‌مرغ و محلول صمغ زانتان به آن اضافه شد و سپس با آب مقطر به وزن 100 گرم رسید. در ادامه مخلـوط حاصـل بوسـیله همـزن خـانگی گاسـونیک (GHM-818، چـین) در مـدت زمان‌های تعیین شده بر اساس طرح مرکب مرکزی با ماکزیمم دور در دمای محیط همزده شد.

بررسی ویژگی‌های کف

دانسیته کف

به‌منظور تعیین دانسیته کف[4] (FD)، با استفاده از استوانه مـدرج، وزن 50 میلی‌لیتـر از نمونـه کـف در دمـای محـیط (22-25 درجـه سانتی‌گراد) تعیین گردیـد (Bag *et al*., 2011). جهـت جلـوگیری از تخریب ساختار کف و نیز ممانعت از ایجاد حفـره هـوا درون اسـتوانه مدرج، انتقال کف به درون استوانه با دقت انجام شـد. دانسـیته کـف ماهی کیلکا به‌صورت جرم در واحد حجم با واحد g/cm^3 گزارش شد.

3 Face-Centered Central Composite Design

4 Foam density

پایداری کف

به‌منظور تعیین پایداری کف آزمون میزان مایع جدا شده (حجم زهکشی[1])(DV) از کف مبتنی بر روش بیان شده توسط Bag و همکاران (2011) همراه با اندکی تغییر مورد استفاده قرار گرفت. در روش اصلاح شده، 50 گرم از نمونه کف به درون قیف بوخنر با قطر 80 میلی‌متر که با صافی توری با مش 40 پوشانده شده بود و روی استوانه مدرج با حجم 25 میلی‌متر قرار داشت، ریخته شد. پس از گذشت یک ساعت، مقدار مایع جدا شده از نمونه کف در اثر نیروی جاذبه در دمای محیط (22 -25 درجه سانتی‌گراد) که درون استوانه مدرج جمع شده بود به‌عنوان حجم زهکشی بر حسب میلی‌لیتر گزارش شد.

خشک کردن کف بهینه با هوای داغ

خشک کردن نمونه‌های کف بهینه شده توسط خشک‌کن غیرمداوم کابینتی با جریان هوای داغ و مجهز به سه سینی مشبک (طب سروش، مشهد) انجام گرفت. جریان هوای داغ در این خشک‌کن از قسمت مرکزی خشک‌کن و با سرعت ثابت 1/5 متر بر ثانیه بود. دقایقی قبل از شروع فرایند خشک کردن، دستگاه خشک‌کن روشن و در دمای مورد نظر تنظیم شد. نمونه‌های کف تولید شده در شرایط بهینه پس از آماده‌سازی در پلیت‌های آلومینیومی با قطر 100 میلی‌متر و ضخامت 7 میکرومتر به‌صورت لایه نازک به ضخامت 3 و 5 میلی‌متر ریخته شده و در دماهای 45، 60 و 75 درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزن ثابت خشک شدند. در ادامه کف‌های خشک شده توسط آسیاب خانگی به پودر تبدیل شدند. پودرها بعد از عبور از صافی درون ظروف شیشه‌ای ریخته شده و پس از دربندی تا انجام آزمون‌ها در دمای یخچال نگهداری شدند.

بررسی سینتیک خشک شدن

همانند مرحله خشک کردن کف، پلیت‌های آلومینیومی حاوی نمونه‌های کف درون خشک‌کن با جریان هوای داغ در ضخامت‌های 3 و 5 میلی‌متر در دماهای 45، 60 و 75 درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. سپس در فواصل زمانی مشخص نمونه‌ها از خشک‌کن خارج و توسط ترازوی دیجیتال (AND.EK-300i، ژاپن) با دقت 01g/± توزین شدند. این فرایند تا رسیدن به وزن ثابتی از نمونه‌ها ادامه پیدا کرد.

محاسبه ضریب نفوذ موثر

محاسبه ضریب نفوذ موثر با استفاده از قانون دوم فیک (معادله 1)، ابزاری جهت توصیف فرایند خشک کردن و مکانیسم‌های ممکن در انتقال رطوبت درون مواد غذایی می باشد.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff}\frac{\partial^2 M}{\partial L^2} \qquad (1)$$

که در این رابطه، M مقدار رطوبت بر حسب ماده خشک، D_{eff} ضریب نفوذ موثر رطوبت (m^2/s)، L جهت انتقال رطوبت (مشخصه فضایی) و t زمان خشک کردن است. با حل معادله فیک توسط Crank (1975)، نفوذ رطوبت برای تیغه نامحدود را می‌توان با استفاده از معادله 2، محاسبه کرد:

$$MR = \frac{8}{\pi^2}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{(2n-1)^2}exp\left(-\frac{(2n-1)^2\pi^2 D_{eff}t}{4L^2}\right) \qquad (2)$$

که در این رابطه MR نسبت رطوبت n=1, 2, 3… عدد صحیح مثبت، t زمان خشک کردن (ثانیه)، D_{eff} ضریب نفوذ موثر (m^2/s) و L ضخامت کف (m) می‌باشد. برای استفاده از این معادله، فرضیات معینی باید در نظر گرفته شوند ازجمله: رطوبت در ابتدا به‌طور یکنواخت درون نمونه پخش شده است، تنها مکانیسم نفوذ در انتقال جرم موثر است، ضریب نفوذ ثابت است و از افت آن می‌توان صرف نظر کرد. در زمان‌های خشک شدن طولانی معادله 2 ساده شده، جملات در سری نامحدود سریعاً همگرا شده و با اولین جمله سری تقریب زده شده و به صورت لگاریتمی نوشته می‌شود (Lopez *et al.*, 2000):

$$Ln(MR) = Ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2 D_{eff}t}{4L^2}\right) \qquad (3)$$

با رسم نمودار Ln(MR) در برابر زمان خشک شدن یک خط مستقیم با شیب K به‌دست می‌آید که از آن برای محاسبه ضریب نفوذ موثر استفاده می‌شود (معادله 4):

$$k = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \qquad (4)$$

محاسبه انرژی فعّال‌سازی

میزان انرژی فعّال‌سازی حدی از انرژی است که مولکول‌های آب باید در مرحله انتقال در محصول طی خشک شدن از آن عبور نمایند. دما مهمترین عامل خارجی موثر بر ضریب نفوذ طی فرایند خشک کردن می‌باشد. وابستگی قابلیت نفوذ مؤثر رطوبت با دما، بر حسب معادله آرنیوس بیان می‌شود (معادله 5) (Akpinar *et al.*, 2003):

$$D_{eff} = D_0 exp\left[-\frac{E_a}{RT}\right] \qquad (5)$$

که در آن D_0 ثابت آرنیوس (m^2/s)، Ea انرژی فعال‌سازی برای نفوذ رطوبت (kJ/mol)، R ثابت جهانی (kJ/k.mol) و T دمای مطلق بر حسب کلوین (K) می‌باشد. با رسم LnDeff در برابر عکس دما، می‌توان انرژی فعّال‌سازی را تعیین نمود.

1 Drainage volume

برازش منحنی‌های خشک شدن و انتخاب مدل مناسب

در این پژوهش 10 مدل استاندارد خشک کردن که در جدول 1، ارائه شده با نسبت رطوبت‌های به‌دست آمده در زمان‌های مختلف خشک شدن توسط نرم‌افزار Matlab 2007 برازش داده شده‌اند. جهت انتخاب بهترین مدل برای فرایند خشک کردن فاکتورهای ضریب همبستگی (R^2)، مربع کای (χ^2) و ریشه میانگین مربعات (RMSE) مورد ارزیابی قرار گرفتند. بهترین مدل خشک کردن دارای حداکثر میزان (R^2) و حداقل میزان χ^2 و RMSE است.

جدول 1- مدل‌های ریاضی مورد استفاده برای ارزیابی سینتیک خشک شدن

ردیف	نام مدل	مدل
۱	پیج	$MR = \exp(-kt^n)$
۲	هندرسون و پابیس اصلاح شده	$MR = a\exp(-kt) + b\exp(-gt) + c\exp(-ht)$
۳	دو جمله ای نمایی	$MR = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-kat)$
٤	لگاریتمی	$MR = a\exp(-kt) + c$
٥	تقریب انتشار	$MR = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-kbt)$
٦	معادله ساده شده انتشار فیک	$MR = a\exp(-c(t/L^2))$
٧	میدیلی	$MR = a\exp(-kt^n) + bt$
٨	جنا و داس	$MR = a\exp(-kt + b\sqrt{t}) + c$
٩	لجستیک	$MR = a / (1+b)\exp(kt)$
۱۰	توزیع ویبل	$MR = a - b\exp(-kt^n)$

بررسی ریز ساختار کف خشک شده

به‌منظور بررسی ریز ساختار کف ماهی خشک شده، از میکروسکوپ الکترونی روبشی[1] (SEM) (LEO 1450 VP، آلمان) با قدرت تفکیک 2/5 نانومتر با ولتاژ 20kv استفاده شد. ابتدا بخشی از کف خشک شده را از پلیت آلومینیومی جدا کرده سپس نمونه‌ها در خلاء قرار گرفتند تا کاملاً خشک شوند. در مرحله بعد روی نمونه‌ها توسط دستگاه لایه نشانی طلا مدل SC 7620 با مخلوط طلا- پالادیوم پوشش‌دهی شد و در نهایت توسط میکروسکوپ عمل عکس‌برداری صورت گرفت.

بررسی ویژگی‌های پودر ماهی کیلکا

میزان رطوبت

حدود یک گرم از نمونه‌های پودر داخل پلیتی‌هایی با وزن مشخص که کاملاً تمیز و خشک بودند، ریخته شد. سپس پلیت‌ها به مدت 24 ساعت در آون 90 درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند تا به وزن ثابت برسند. پلیت‌ها پس از خروج از آون و سرد شدن در دسیکاتور توزین شدند. محتوای رطوبتی از روی اختلاف وزن بین پودرها قبل و بعد از فرایند خشک کردن محاسبه شد.

فعالیت آبی (a_w)

برای اندازه‌گیری فعّالیت آبی از دستگاه a_w متر (Rotronic Hygrolab 2، سوئیس) استفاده شد. برای این منظور مقداری از پودر در ظرف مخصوص دستگاه ریخته شد و پس از برقراری تعادل، میزان فعّالیت آبی در دمای 1± 25 درجه سانتی‌گراد ثبت شد.

قابلیت جذب آب

میزان قابلیت جذب آب[2] نمونه‌های پودر بر اساس روش Tonon و همکاران (2008) تعیین شد. طبق این روش، یک گرم از نمونه‌های پودر درون پلیت‌های تمیز و با وزن مشخص، توزین شدند. سپس پلیت‌ها بلافاصله درون دسیکاتور حاوی محلول اشباع آب و نمک قرار داده شدند. پس از دربندی، دسیکاتور به مدت یک هفته در اینکوباتور با دمای 25 درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. پس از این مدت، پلیت‌ها از درون دسیکاتور خارج و توزین شدند. در نهایت میزان قابلیت جذب آب به‌صورت گرم آب جذب شده در 100 گرم ماده خشک (g/100g) بیان شد.

پارامترهای رنگی

رنگ نمونه‌های پودر ماهی با استفاده از دستگاه رنگ‌سنج (Minolta CR-410 series، ژاپن) با مقیاس‌های رنگی تاریکی- روشنایی (L*)، سبزی- قرمزی (a*) و آبی- زردی (b*) اندازه‌گیری شد. قبل از اندازه‌گیری پارامترهای رنگی، دستگاه با

1. Scanning Electron Microscope

2 Hygroscopicity

استفاده از کاشی سفید استاندارد ($L^*=98.14$، $a^*=0.23$، $b^*=1.89$) کالیبره شد و ارزیابی رنگ پودرها در فضای L^*، a^* و b^* انجام گرفت. پارامترهای دیگری که از پارامترهای رنگی فوق به‌دست می‌آیند، شامل شاخص کروما، زاویه هیو[1] و اندیس قهوه‌ای شدن[2] (BI) است.

شاخص کروما نشان‌دهنده میزان اشباع‌شدگی و یا شدت رنگ است که بر اساس معادله زیر به‌دست می‌آید:

$$Chroma = (a^2 + b^2)^{1/2} \quad (6)$$

زاویه هیو شاخصی از رنگ ماده غذایی است که زاویه صفر و یا 360 درجه، نمایانگر رنگ قرمز و زاویه‌های 90، 180 و 270 درجه به‌ترتیب نشان‌دهنده رنگ‌های زرد، سبز و آبی می باشد:

$$Hue\ angel = tan^{-1}\left(\frac{b}{a}\right) \quad (7)$$

شاخص قهوه‌ای شدن یکی دیگر از شاخص‌های مورد اندازه‌گیری پارامترهای رنگی است که میزان تغییر رنگ محصول به سمت رنگ قهوه‌ای را نشان می‌دهد و از طریق معادله 8 محاسبه می‌شود:

$$BI = \frac{(100-(X-0.31))}{0.71} \quad (8)$$

که در این معادله مقدار x برابر است با:

$$X = \frac{a+1.75L}{5.645L+a-3.012b} \quad (9)$$

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

طرح آماری و تجزیه و تحلیل داده‌ها جهت بهینه‌سازی شرایط تولید کف

طراحی آزمایش، آنالیز نتایج و تعیین شرایط بهینه تولید کف با استفاده از روش سطح پاسخ و نرم‌افزار Expert Design نسخه 6.0.2 انجام گرفت. در این تحقیق از طرح مرکب مرکزی متمرکز شده با سه متغیّر مستقل در سه سطح و شش تکرار در نقطه مرکزی طرح استفاده گردید به‌طوری که مجموع کل تیمارها 20 عدد بود. متغیّرهای مستقل شامل مقدار پودر سفیده تخم‌مرغ، غلظت صمغ زانتان و زمان همزدن بود. همچنین متغیّرهای وابسته (پاسخ) شامل دانسیته کف (بیان‌کننده قابلیت کف‌زایی) و حجم زهکشی (نشان‌دهنده پایداری کف) بودند. این طرح آزمایشی شامل سه سطح فاکتور کدبندی بود (1-، 0، 1+) به‌طوری که سطح پائین هر فاکتور به‌عنوان کمینه و به‌صورت 1-؛ سطح میانی هر فاکتور با صفر و سطح بالای هر فاکتور به‌عنوان بیشینه و به‌صورت1+ مشخص شد. محدوده آزمایش‌ها بر پایه نتایج به‌دست آمده از پیش تیمارها انتخاب شد که بر این اساس مقدار پودر سفیده تخم‌مرغ 6 -3 درصد، صمغ زانتان 0/4- 0/1 درصد و زمان همزدن 9 -3 دقیقه تعیین شدند (جدول 2). برای ارزیابی رفتار سطوح پاسخ، یک معادله چند جمله‌ای درجه دوم برای هر متغیّر مستقل برازش داده شد:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{3}\beta_i X_i + \sum_{i=1}^{3}\beta_{ii} X_{ii}^2 + \sum_{i=1}^{2}\sum_{j=i+1}^{3}\beta_{ij} X_i X_j \quad (10)$$

که در این رابطه Y پاسخ تخمین زده شده (دانسیته و پایداری کف)، β_0، β_i ، β_{ii} و β_{ij} ضرایب ثابت، و X_i و X_j بیان‌کننده متغیّرهای مستقل کدگذاری شده هستند. کیفیت و صحت مدل رگرسیونی و مناسب بودن برازش صورت گرفته به‌وسیله پارامترهایی نظیر آنالیز مدل، ضعف برازش[3] و ضریب تعیین مشخص می‌شود (Kaur *et al*., 2009).

جدول 2- سطوح متغیّرهای مستقل به همراه کدهای آنها

متغیّرهای مستقل	نماد	کد و سطوح مربوطه		
		-1	0	+1
پودر سفیده تخم‌مرغ (٪)	X_1	3	4/5	6
صمغ زانتان (٪)	X_2	0/1	0/25	0/4
زمان همزدن (دقیقه)	X_3	3	6	9

طرح آماری و تجزیه و تحلیل داده‌های مربوط به پودر

ویژگی‌های پودر تولید شده در قالب طرح کاملاً تصادفی در 6 تیمار و 3 تکرار مورد بررسی قرار گرفت. آنالیز واریانس و رگرسیون با استفاده از نرم‌افزار Minitab 16 انجام شد و از آزمون توکی برای مقایسه میانگین‌ها در سطح احتمال 95 درصد استفاده شد ($p<0/05$).

نتایج و بحث

بهینه‌سازی فرایند تولید کف با استفاده از روش سطح پاسخ

نتایج حاصل از طرح آزمایش مورد استفاده برای بهینهسازی شرایط تولید کف در جدول 3، ارائه شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده از آنالیز آماری داده‌ها، به‌منظور بررسی اثر متغیرهای مستقل بر روند و پیشگویی خصوصیات کف مدل چندجمله‌ای درجه دوم برای میزان دانسیته و حجم زهکشی کف انتخاب گردید.

تأثیر متغیّرهای مستقل بر پاسخ‌ها

دانسیته کف

نتایج نشان داد که سفیده تخم‌مرغ و صمغ زانتان ($p<0/05$) و زمان همزدن ($p<0/01$) به‌صورت خطی اثر معنی‌داری روی دانسیته کف داشتند. همچنین اثر درجه دوم صمغ زانتان ($p<0/05$)، اثرات متقابل سفیده تخم‌مرغ و زمان همزدن ($p<0/01$) و اثر متقابل صمغ

---

1 Hue angel

2 Browning index

3 Lack of fit test

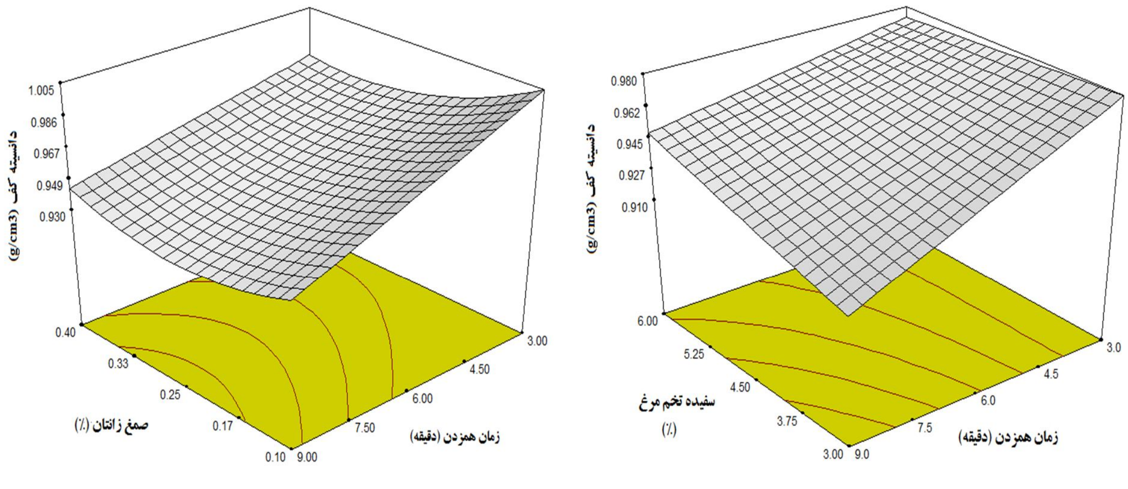
زانتان و زمان همزدن (p<0/05) نیز معنی‌دار بود. با قرار دادن مدل چندجمله‌ای درجه دوم در معرض الگوریتم حذف پسخور، مدل تجربی نهایی در قالب فاکتورهای کدگذاری شده که اثر معنی‌داری روی دانسیته کف داشتند به‌صورت معادله زیر ارائه شد:

$$FD = 1.113 - 8.866 \times 10^{-3}X_1 - 0.441X_2 - 0.0220X_3 + 0.591{X_2}^2 + 2.277 \times 10^{-3}X_1X_3 + 0.0161 \times X_2X_3 \quad (11)$$

که در این رابطه X_1 مقدار پودر سفیده تخم‌مرغ (g/100g)، X_2 غلظت صمغ زانتان (g/100g) و X_3 زمان همزدن (دقیقه) هستند. تغییر دانسیته کف با میزان سفیده تخم‌مرغ، صمغ زانتان و زمان همزدن به‌صورت سه‌بعدی در شکل 1، نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، با افزایش میزان پودرسفیده تخم‌مرغ از 3 به 6 درصد مقدار دانسیته کف به‌طور معنی‌داری کاهش پیدا کرده است. سفیده تخم‌مرغ به دلیل دارا بودن پروتئین‌هایی با قابلیت کف‌زایی بالا ناشی از دناتوره شدن آنها و افزایش گروه‌های آب دوست در سطح باعث کاهش دانسیته کف می‌شود (Raharitsifa *et al.*, 2006). افزایش صمغ تا حدود 0/33 گرم سبب کاهش دانسیته و پس از آن باعث افزایش دانسیته کف می‌شود. ویسکوزیته مایع نقش مهمی در میزان دانسیته دارد و حد معینی از ویسکوزیته برای ایجاد مقدار دانسیته مناسب مورد نیاز است (Baer *et al.*, 1997). افزایش بیش از حد ویسکوزیته در غلظت‌های بالای صمغ، مانع از ورود هوا به داخل سیستم شده، حداکثر میزان هوای محبوس شده در مخلوط را کاهش می‌دهد، از این رو موجب کاهش انبساط و در نتیجه افزایش دانسیته کف می‌شود (Bikerman, 1973). با افزایش زمان همزدن، دانسیته نمونه‌ها به علت ورود هوای بیشتر به درون سیستم‌های کف و به دام افتادن درون سیستم به‌صورت حباب کاهش پیدا می‌کند. همچنین افزایش زمان همزدن می‌تواند به‌دلیل افزایش میزان دناتوراسیون پروتئین‌ها و کاهش کشش سطحی سبب کاهش دانسیته کف شود. مشابه این نتایج برای کف آب سیب (Raharitsifa *et al.*, 2006) و پالپ طالبی (صلاحی، 1394) گزارش شده است.

جدول 3- نتایج طرح آزمایشی مورد استفاده به‌منظور بهینه‌سازی شرایط تولید کف ماهی کیلکا

ردیف	متغیّر های مستقل			پاسخ ها	
	پودر سفیده تخم مرغ (g/100 g)	صمغ زانتان (g/100g)	زمان همزدن (دقیقه)	دانسیته (g/cm^3)	حجم زهکشی (ml)
1	4/5 (0)	0/4 (+1)	6 (0)	0/951	0/3
2	4/5 (0)	0/25 (0)	9 (+1)	0/931	0
3	3 (-1)	0/4 (+1)	3 (-1)	0/984	0/8
4	4/5 (0)	0/1 (-1)	6 (0)	0/959	6/8
5	4/5 (0)	0/25 (0)	6 (0)	0/950	0/5
6	6 (+1)	0/4 (+1)	3 (-1)	0/973	0
7	3 (-1)	0/25 (0)	6 (0)	0/941	1
8	4/5 (0)	0/25 (0)	6 (0)	0/954	0/05
9	3 (-1)	0/4 (+1)	9 (+1)	0/929	0
10	4/5 (0)	0/25 (0)	6 (0)	0/956	0/15
11	6 (+1)	0/4 (+1)	9 (+1)	0/960	0/4
12	6 (+1)	0/1 (-1)	3 (-1)	1/01	7
13	4/5 (0)	0/25 (0)	3 (-1)	0/969	1
14	4/5 (0)	0/25 (0)	6 (0)	0/965	0/12
15	6 (+1)	0/25 (0)	6 (0)	0/951	0/8
16	6 (+1)	0/1 (-1)	9 (+1)	0/967	8
17	3 (-1)	0/1 (-1)	3 (-1)	1/009	9
18	4/5 (0)	0/25 (0)	6 (0)	0/959	0/05
19	3 (-1)	0/1 (-1)	9 (+1)	0/926	5/3
20	4/5 (0)	0/25 (0)	6 (0)	0/959	0/7



ب الف

شکل 1- نمودار سطح پاسخ دانسیته کف: الف) تاثیر پودرسفیده تخم‌مرغ و زمان همزدن. ب) تاثیر صمغ زانتان و زمان همزدن

پایداری کف

نتایج نشـان داد کـه زمـان همـزدن (p<0/05) و صـمغ زانتـان (p<0/01) به‌صورت خطی اثر معنی‌داری روی پایداری کـف داشـتند. همچنین اثر درجه دوم صمغ زانتان (p<0/01) و اثرات متقابل سفیده تخم‌مرغ و زمان همزدن (p<0/01) نیز معنی‌دار بود. با قرار دادن مدل چندجمله‌ای درجه دوم در معرض الگوریتم حذف پسخور، مدل تجربی نهایی در قالب فاکتورهای کدگذاری شـده کـه اثـر معنـی‌داری روی پایداری کف داشتند به‌صورت معادله زیر ارائه شد:

$$DV = 20.649 - 0.9766X_1 - 96.911X_2 - 0.874X_3 + 147.688X_2^2 + 0.164X_1X_3 \quad (12)$$

که در این رابطه X_1 مقدار پودر سفیده تخـم‌مـرغ (g/100g)، X_2 غلظت صمغ زانتان (g/100g) و X_3 زمان همـزدن (دقیقـه) هسـتند. تغییر پایداری کف با میزان سفیده تخم‌مـرغ، صـمغ زانتـان و زمـان همزدن به‌صورت سه‌بعدی در شکل 2 نشان داده شده است. همانطور که در شکل2، مشاهده می‌شود صمغ زانتان نقش اساسـی و مهـم در پایداری کف دارد. افزایش میزان صمغ سبب افزایش ویسکوزیته فـاز پیوسته و خاصیت ویسکوالاستیکی و ارتجاعی لاملا می‌شـود کـه در این حالت مقاومت دیواره حباب بیشتر شده، منجر به افزایش استحکام ساختار کف و ممانعت از فروپاشی حباب‌ها می‌شود (Papalamprou *et al.*, 2005). Prins (1988) بیان کرد که افزایش ویسکوزیته فـاز مایع سبب ایجاد یک ساختار شبکه‌ای در فاز پیوسته شده به‌طوری که دیواره فصل مشترک را از شکسته شدن حفظ می‌کند و باعث بهبـود پایداری کف می‌شود. نتایج مشابه‌ای توسط Bag و همکاران (2011)، عزیزپـور (1391)، پاسـبان (1391)، پورمهـدی (1391)، عطـاردی (1393) و صلاحی (1394) به‌ترتیب در بررسی پایداری کف‌های پالپ میوه Bael، میگو، قـارچ دکمـه‌ای، پـوره سـیب‌زمینـی، ریـز جلبـک اسپیرولینا و پالپ طالبی گزارش شده است. همچنین نتایج نشـان داد که افزایش زمان همزدن نیز سبب افزایش پایداری کف شـده اسـت. افزایش زمان همزدن سبب دناتوره شدن بیشتر پروتئین‌هـای سـفیده تخم‌مرغ و افزایش گروه‌های آبدوست در سطح و در نتیجـه افـزایش پایداری کف می‌گردد. نتایج مشابه‌ای توسط Raharitsifa و همکاران (2006)، عطاردی (1393) و صلاحی (1394) گزارش شده است.

تعیین شرایط بهینه تولید کف

به‌منظور تولید کف مطلوب از نظر دانسیته و مقدار مایع جدا شده، سطوح بهینه پودر سفیده تخم‌مرغ، غلظت صمغ زانتان و زمان همزدن با استفاده از تکنیک بهینه‌سـازی عـددی نـرم‌افـزار Design expert تعیین گردید. در این پژوهش، هدف از بهینه‌سازی، تولید کف مـاهی کیلکا با حداقل میزان دانسیته و حجم زهکشی بـود. بـر ایـن اسـاس شرایط بهینه جهت تولید کف مـاهی بـا کمتـرین میـزان دانسـیته و کمترین میزان حجم زهکشی در مقدار پودر سـفیده تخـم‌مـرغ 3/67 درصد، غلظت صمغ زانتان 0/28 درصد و زمان همزدن 8/93 دقیقـه تعیین شد. در این شرایط مقادیر دانسیته و حجم زهکشی اندازه‌گیری شده به‌ترتیب 0/92 گرم بر سانتی‌متر مکعب و صفر میلی‌لیتر بود.

ارزیابی فرایند خشک شدن کف

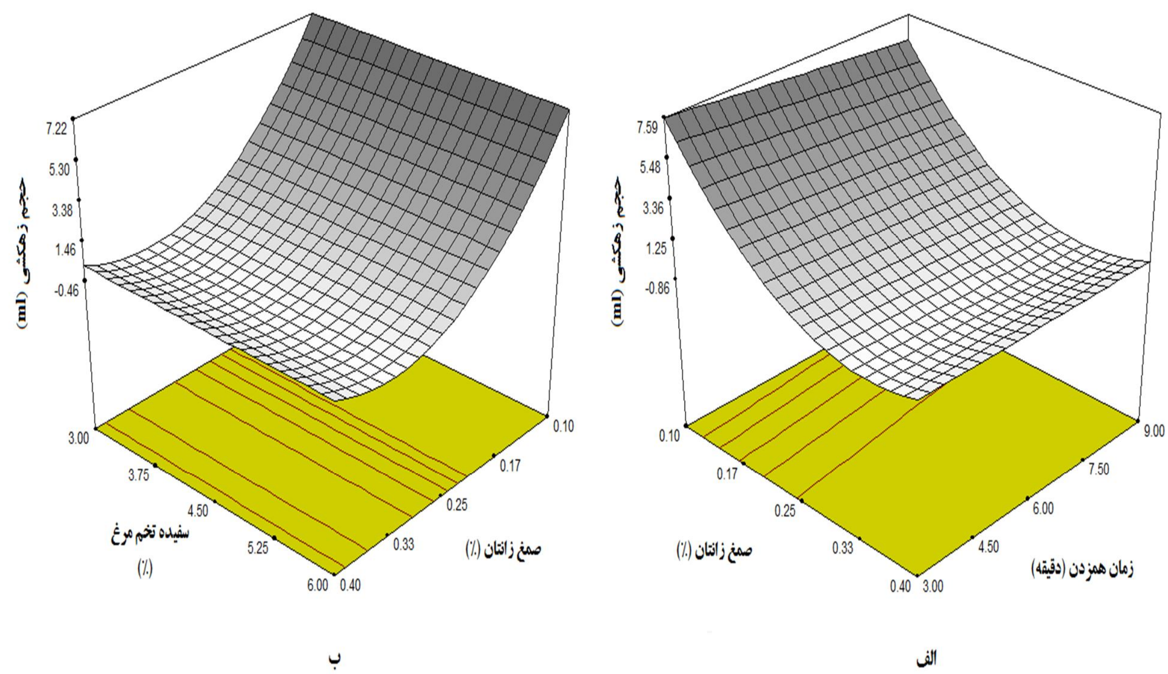
بررسی منحنی‌های خشک شدن

در شکل 3، تغییرات نسبت رطوبت با زمان در دماهای 45، 60 و

75 درجه سانتی گراد و در دو ضخامت 3 و 5 میلی متـر، نشـان داده شده است. طبق انتظار، همـانطور کـه در شـکل مشـخص اسـت بـا افزایش دمای خشک کردن و کاهش ضخامت کـف سـرعت خشـک شدن نمونه‌های کف افزایش پیدا کرده است.

مدل‌سازی سینتیک خشک کردن

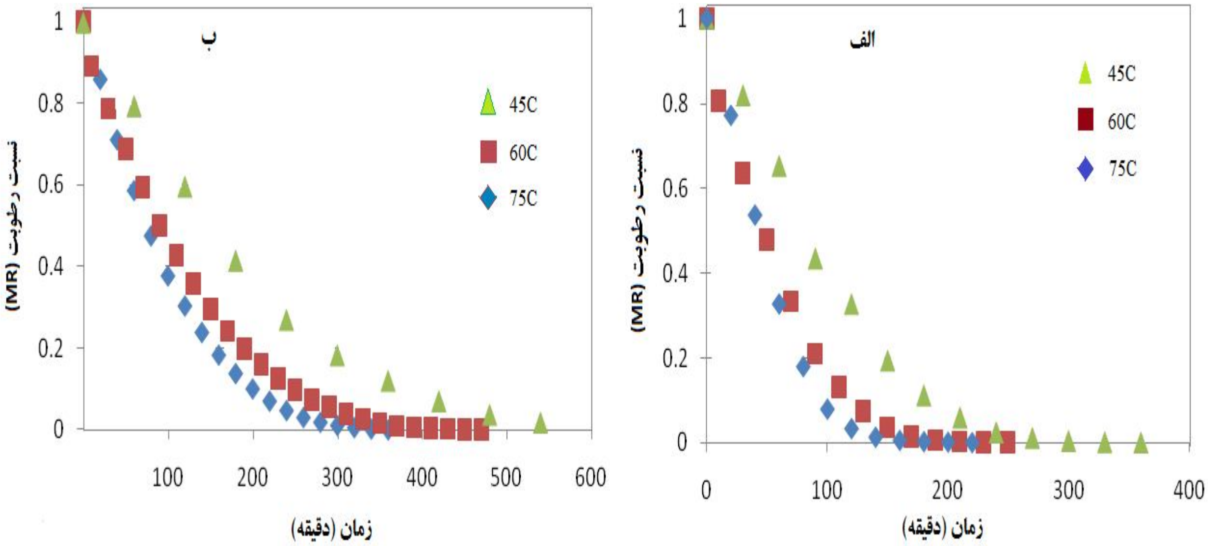
مدل‌های مختلف توسط سه معیار ضریب همبستگی، مربع کای و ریشه میانگین مربعات خطا با یکدیگر مقایسـه و در نهایـت مـدلی انتخاب گردید که دارای بیشـترین مقـدار R^2 وکمتـرین مقـدار χ^2 و RMSE باشد. با توجه به معیارهای بیان شده برای انتخاب بهتـرین مدل، در تمام حالت‌هـای خشـک شـدن کـف بهینـه از نظـر دمـا و ضخامت، مدل ویبل دارای بهترین برازش با داده‌های آزمایشی بـود. مشابه این نتایج برای خشک کردن کـف‌پوشـی پـوره سـیب‌زمینـی (1391) و پالـپ طـالبی گـزارش شـده اسـت (صـلاحی، 1394). پارامترهای آماری و ضرایب ثابت مدل ویبل به‌دست آمده در شـرایط مختلف خشک شدن در جدول 4 گزارش شده است



شکل 2- نمودار سطح پاسخ حجم زهکشی کف: الف) تاثیر صمغ زانتان و زمان همزدن. ب) تاثیر پودر سفیده تخم‌مرغ و صمغ زانتان

جدول 4- نتایج آماری و پارامترهای ثابت حاصل از برازش داده های آزمایش با مدل ویبل در شرایط مختلف خشک کردن

ضخامت کف (mm)	دما (°C)	a	b	k	n	R^2	χ^2	RMSE
3	45	-0/0130	-1/006	0/0015	1/40	0/998	0/00021	0/0121
	60	-0/0294	-1/002	0/0093	1/12	0/996	0/00058	0/0204
	75	-0/0053	-1/0	0/0031	1/44	0/999	0/00008	0/0076
5	45	-0/0150	-1/012	0/0013	1/25	0/999	0/00004	0/0048
	60	-0/0131	-1/016	0/0014	1/42	0/997	0/00022	0/0120
	75	-0/0287	-1/025	0/0046	1/15	0/999	0/00002	0/0036



شکل 3- تغییرات نسبت رطوبت با زمان در دماهای مختلف خشک کردن کف ماهی کیلکا: الف) ضخامت 3 میلی‌متر؛ ب) ضخامت 5 میلی‌متر

محاسبه ضریب نفوذ موثر و انرژی فعّال سازی

شکل 4 نمودار lnMR را در برابر زمان خشک شدن نمونه‌های کف ماهی کیلکا نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است رابطه lnMR با زمان غیرخطی است که نشان‌دهنده تغییر ضریب نفوذ موثر با محتوای رطوبتی است. مقادیر ضریب نفوذ موثر حین خشک کردن کف بهینه شده در جدول 5 ذکر شده است. ضریب نفوذ موثر در بازه دمایی 45 تا 75 درجه سانتی‌گراد در ضخامت‌های 3 و 5 میلی‌متر از کف به‌ترتیب در محدوده $7/266\times10^{-8}$ تا $10^{-7}\times 1/310$ و $7/404\times10^{-8}$ تا $10^{-7}\times 1/693$ متر مربع بر ثانیه می‌باشد. نتایج بیانگر این واقعیت است که با افزایش دما ضریب نفوذ موثر افزایش پیدا کرده است که دلیل این امر اثر مثبت دما در افزایش شدت فعل و انفعّالات و جنبش مولکولی است که به دلیل افزایش اختلاف دمایی سبب افزایش سرعت انتقال رطوبت از مرکز به پوسته می‌شود. (عزیزپور، 1391). با افزایش ضخامت کف نیز مقادیر ضریب نفوذ موثر افزایش پیدا کرده است. در واقع با افزایش ضخامت، مهاجرت رطوبت درونی در فاصله بیشتری نسبت به ضخامت‌های کمتر اتفاق می‌افتد (پارامتر L آن هم با توان 2 در معادله 4 بیشتر می‌شود) که این امر سبب افزایش میزان ضریب نفوذ موثر در ضخامت‌های بالاتر می‌شود. بنابراین الزاماً بالاتر بودن ضریب نفوذ نشان‌دهنده بالاتر بودن سرعت خشک شدن و در نتیجه کمتر بودن زمان فرایند خشک شدن نیست، بلکه این دو پارامتر به مقدار و ضخامت نمونه نیز بستگی دارند. نتایج مشابه‌ای برای خشک کردن کف پوشی پالپ انبه (Raharitsifa *et al.*, 2006)، ریزجلبک اسپیرولینا پلاتنسیس (عطاردی، 1393) و پالپ طالبی (صلاحی، 1394)گزارش شده است.

مقادیر انرژی فعّال‌سازی از روی نمودار تغییرات $\ln D_{eff}$ در برابر عکس دما مطلق به‌دست آمدند. انرژی فعال‌سازی برای ضخامت 3 و 5 میلی‌متر ماهی کیلکا به‌ترتیب 18/201 و 25/615 کیلوژول بر مول محاسبه شده است. مشابه این مقادیر برای خشک کردن کف‌پوشی موز در دانسیته‌های 0/3، 0/5 و 0/7گرم بر سانتی‌متر مکعب (به‌ترتیب برابر با 21/08، 22/9 و 25/19 کیلو ژول بر مول) (Thuwapanichayanan *et al.*, 2008) و برای انبه پیش تیمار شده با اسمز و خشک شده به روش کف‌پوشی (22/3 کیلو ژول بر مول) (Alakali *et al.*, 2010) گزارش شده است.

تأثیر دمای خشک کردن بر ریز ساختار کف

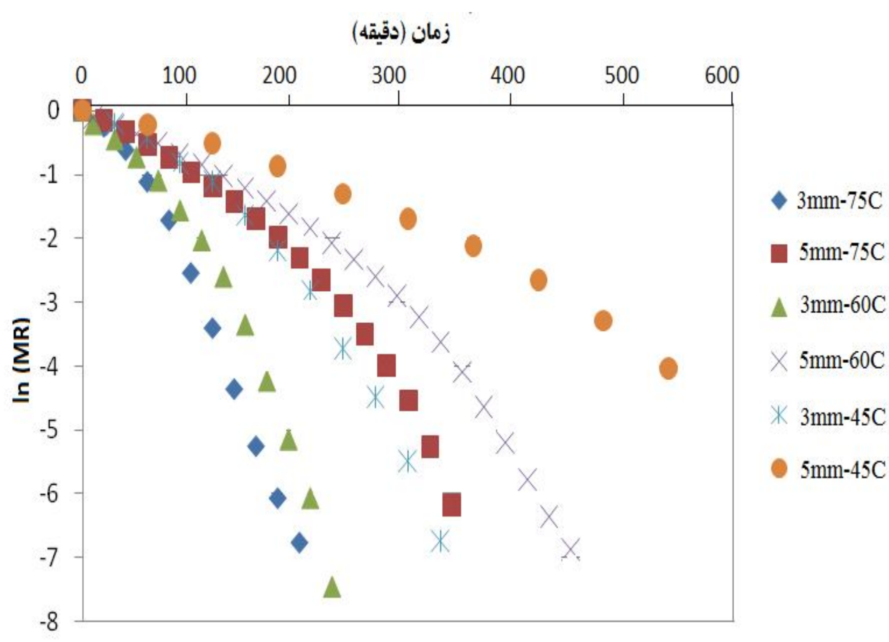
کاملاً واضح است که ساختار یک ماده تعیین‌کننده خواص عملکردی آن بوده و تغییر خواص ماکروسکوپی مواد تحت تاثیر تغییر در ساختار میکروسکوپی می‌باشد. به‌طور مثال وجود ساختار متخلخل سبب افزایش سرعت خروج رطوبت از ماده طی خشک کردن می‌شود. در مقابل، ساختار فشرده و با تخلخل پایین در سطح سبب آهسته‌تر شدن مهاجرت رطوبت در طی فرایند خشک کردن می‌شود. بررسی ریز ساختار می‌تواند به درک درستی از مکانیسم‌ها و تغییرات در خواص کیفی به خصوص تغییرات در بافت ماده غذایی کمک نماید (Xiao *et al.*, 2012). تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ماهی کیلکا خشک شده به روش کف‌پوشی در دماهای مختلف در شکل 5 ارائه شده است. در بررسی تصاویر مشخص شد که در دمای 45 درجه سانتی‌گراد ساختار کف‌های خشک حالت صاف دارد و سطح صیقلی در کف خشک شده ایجاد شده، به‌طوری که ساختار داخلی بافت کف غیرقابل مشاهده شده است. با افزایش دما به‌خصوص در دمای 75 درجه سانتی‌گراد، ساختار حالت غیرمسطح و متخلخل‌تری پیدا کرده

است. دلیل این رفتار را می‌توان چنین بیان کرد که با افزایش دما احتمالاً به دلیل کاهش زمان خشک شدن، فروپاشی و ترکیب شدن حباب‌های مجاور کمتر اتفاق افتاده که منجر به افزایش تخلخل شده است (عزیزپور، 1391). همچنین تصاویر نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت، کف خشک شده حالت مسطح داشته و تخلخل کمتری دارد که احتمالاً دلیل این امر فروپاشی ساختار کف به دلیل طولانی شدن زمان خشک شدن می‌باشد. مشابه این نتایج برای خشک کردن کف پوشی پالپ طالبی گزارش شده است (صلاحی، 1394). Thuwapanichayanan و همکاران (2011) اثر دمای خشک کردن را بر نفوذ رطوبت و ویژگی‌های کیفی برش‌های موز مورد مطالعه قرار دادند. آنها دریافتند که دمای خشک کردن به شدت روی ساختار موز خشک شده اثر گذاشته و با افزایش دما اندازه و تعداد حفرات افزایش پیدا کرده که این امر اثر قابل توجهی بر ویژگی سختی بافت نمونه‌ها داشته است.

بررسی ویژگی‌های پودر

میزان رطوبت و فعّالیت آبی (a_w)

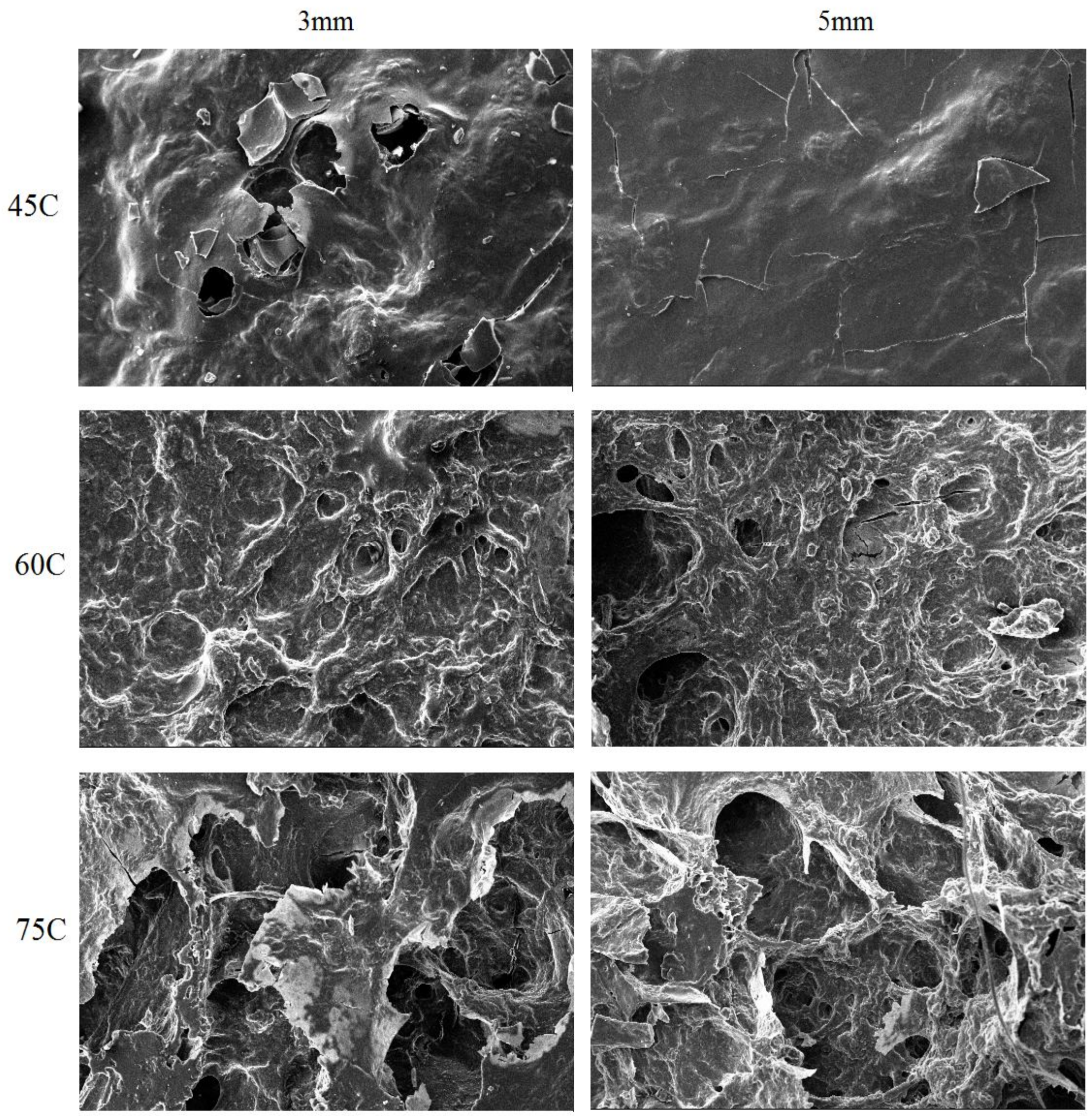
محتوای رطوبتی نمونه های پودر در بازه 40/3 درصد (ضخامت 3 میلی‌متر و دمای 75 درجه سانتی‌گراد) تا 42/6 درصد (ضخامت 5 میلی‌متر و دمای 45 درجه سانتی‌گراد) قرار داشت. (جدول 6). با افزایش دما، اختلاف دمای بین کف و هوای خشک کردن افزایش پیدا می‌کند که منجر به افزایش نرخ انتقال حرارت به درون ساختار کف می‌شود که این امر سبب ایجاد نیروی محرکه بیشتری برای تبخیر آب و در نتیجه تولید پودر با محتوای رطوبتی پایین می‌شود (Fazaeli *et al*., 2010). به علاوه، در دماهای بالاتر به دلیل دناتوره شدن پروتئین نمونه‌ها، ساختار پروتئین تغییر کرده، توانایی نگهداری آب توسط پروتئین‌ها کم می‌شود (Fennema, 1996). نتایج مشابهی توسط Kolawole و Okocha (2010)، Kadam و Balasubramanuan (2011) عزیزپور (1391) و صلاحی (1394) به‌ترتیب برای خشک کردن کف‌پوشی موز، آب گوجه‌فرنگی، میگو و پالپ طالبی گزارش شده است. افزایش ضخامت اثر منفی بر کاهش میزان رطوبت داشت، به‌طوری که با افزایش ضخامت، مقدار رطوبت پودرها بیشتر شد. دلیل این امر پایین‌تر بودن نرخ انتقال حرارت در ضخامت‌های بالاتر و احتمالاً فروپاشی ساختار کف است که مانع از خروج رطوبت می‌شود. نتایج مشابه‌ای برای خشک کردن کف‌پوشی پالپ طالبی گزارش شده است (صلاحی، 1394). اثرات دمای خشک کردن و ضخامت کف روی فعّالیت آبی با اثر آنها روی محتوای رطوبتی پودرها همخوانی داشت (جدول 6). میزان فعّالیت آبی پودرها در محدوده 0/258 تا 0/346 قرار داشت. به‌طور کلی دماهای بالاتر خشک کردن و ضخامت‌های کمتر، پودرهایی با فعّالیت آبی کمتری ایجاد می‌کردند. مواد غذایی که میزان فعّالیت آبی آنها کمتر از 0/6 است از نظر میکروبی پایدار هستند (صلاحی، 1394). با توجه به این که مقادیر فعّالیت آبی پودرها در این مطالعه کمتر از 35/. است، لذا، می‌توان پودرها را از نظر میکروبی طی نگهداری پایدار دانست.



شکل 4- رابطه بین ln(MR) و زمان خشک شدن کف ماهی کیلکا در شرایط مختلف خشک کردن

جدول 5- مقادیر ضریب نفوذ موثر و انرژی فعّال سازی کف ماهی کیلکا در تیمارهای آزمایش

ضخامت کف (mm)	دما ($^{\circ}C$)	R^2	ضریب نفوذ موثر آب (m^2/s)	E_a (kJ/mol)
3	45	0/942	$7/266\times10^{-8}$	18/201
	60	0/944	$1/11\times10^{-7}$	
	75	0/978	$1/31\times10^{-7}$	
5	45	0/976	$7/404\times10^{-8}$	25/615
	60	0/938	$1/44\times10^{-7}$	
	75	0/945	$1/693\times10^{-7}$	



شکل 5- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) کف ماهی کیلکا خشک شده در تیمارهای آزمایش با بزرگنمایی 250

جدول 6- اثر شرایط مختلف خشک کردن بر ویژگی های فیزیکوشیمیایی و پارامترهای رنگی پودر ماهی کیلکا

شرایط خشک کردن	محتوای رطوبتی (g/100g)	فعالیت آبی (a_w)	قابلیت جذب آب (٪)	L^*	a^*	b^*	Chroma	Hue angle	BI
3 mm- 45°C	5/58[b]	0/320[ab]	19/68[bc]	68/67[bc]	4/84[abc]	34/17[a]	34/51[a]	81/93[abc]	140/67[a]
3 mm- 60°C	4/26[c]	0/279[bc]	20/74[ab]	71/45[a]	4/05[c]	33/27[a]	33/52[a]	83/06[a]	140/69[a]
3 mm- 75°C	3/40[e]	0/258[c]	21/01[a]	70/12[abc]	5/71[ab]	34/45[a]	34/92[a]	80/59[cd]	140/67[a]
5 mm- 45°C	6/42[a]	0/346[a]	18/71[c]	67/92[c]	5/41[abc]	35/06[a]	35/47[a]	81/22[bcd]	140/66[a]
5 mm- 60°C	3/74[de]	0/293[abc]	20/50[abc]	70/85[a]	4/44[bc]	33/85[a]	34/14[a]	82/53[ab]	140/68[a]
5 mm- 75°C	3/99[cd]	0/269[bc]	20/63[abc]	69/05[abc]	6/10[a]	35/23[a]	35/75[a]	80/17[d]	140/66[a]

قابلیت جذب آب

قابلیت جذب آب، تمایل پودر برای جذب رطوبت از یک محیط با رطوبت نسبی بالاتر و رسیدن به تعادل با رطوبت موجود در اتمسفر است (Jaya & Das, 2004). اگرچه انتقال بخار آب بین محصولات غذایی جاذب‌الرطوبه و محیط پیرامون یک پدیده فیزیکی و طبیعی است، اما این روند ممکن است بر کیفیت نگهداری این محصولات اثر منفی بگذارد، زیرا کیفیت اکثر مواد غذایی در مقادیر رطوبت بالا آسیب پذیر است (Deman, 1999). مقادیر قابلیت جذب آب پودرهای ماهی کیلکا در محدوده 18/71 درصد (ضخامت 5 میلی‌متر و دمای 45 درجه سانتی‌گراد) تا 21/01 درصد (ضخامت 3 میلی‌متر و دمای 75 درجه سانتی‌گراد) قرار داشت (جدول 6). به‌طور کلی میزان جذب آب با افزایش دمای خشک کردن و کاهش ضخامت، افزایش پیدا کرده است. این نشان می‌دهد که پودرهای با میزان رطوبت پایین‌تر، بالاترین میزان قابلیت جذب آب را دارند، یعنی توانایی بالایی در جذب رطوبت محیط دارند که به دلیل بالا بودن اختلاف مقدار رطوبت بین نمونه‌های پودر و محیط اطراف می‌باشد (Ferrari *et al.*, 2012). مقادیر قابلیت جذب آب مشابه‌ای توسط Franco و همکاران (2016) (15/24-22/31 درصد) و صلاحی (1394) (16/73-20/76 درصد) به‌ترتیب برای پودرهای عصاره Yacon و پالپ طالبی تولید شده به روش کف‌پوشی گزارش شده است.

پارامترهای رنگی

دما و زمان خشک کردن از مهمترین پارامترهای موثر بر تغییرات رنگ مواد غذایی هستند (Hu *et al.*, 2006). نتایج مربوط به پارامترهای رنگ پودر ماهی کیلکا در جدول 6، ارائه شده است. با توجه به نتایج، اختلاف معنی‌داری در مقادیر مؤلفه‌های *L و *a مشاهده می‌شود ($p<0/05$). اما در تیمارهای مختلف خشک کردن، مقادیر پارامتر *b از نظر آماری بی‌معنی بود ($p>0/05$). در هر دو ضخامت 3 و 5 میلی‌متر، پودرهای تولید شده در دمای 60 درجه سانتی‌گراد نسبت به دماهای 45 و 75 درجه سانتی‌گراد، مقدار *L بالاتر و *a پایین‌تری داشتند. این شرایط را می‌توان به دمای بالای خشک کردن در 75 درجه سانتی‌گراد و مدت زمان طولانی خشک کردن در 45 درجه سانتی‌گراد نسبت داد، زیرا در این شرایط (دمای بالا و یا زمان طولانی) واکنش‌های مربوط به تغییر رنگ بیشتر صورت می‌گیرد و رنگ و ظاهر نمونه‌ها تیره‌تر خواهد شد. همچنین این امر در مورد ضخامت‌های بیشتر خشک کردن نیز صادق است. زیرا در نمونه‌های با ضخامت بالاتر، نمونه مدت زمان بیشتری را در معرض حرارت قرار داشته از این رو واکنش‌های ایجادکننده رنگ بیشتر در آن اتفاق افتاده است. به‌طورکلی پارامترهای رنگی *L و *a به تغییرات رنگی ناشی از واکنش‌های قهوه‌ای شدن مرتبط هستند به‌طوری که با افزایش واکنش‌های قهوه‌ای شدن مقدار *L کاهش و *a افزایش می‌یابد (Mandala *et al.*, 2005). نتایج نشان داد که شرایط مختلف خشک کردن اثر معناداری روی پارامترهای کروما و شاخص قهوه‌ای شدن ندارد. با این حال، تغییرات شاخص کروما، متناسب با تغییرات ایجاد شده در میزان زردی و قرمزی نمونه‌ها در شرایط مختلف خشک کردن است. علاوه بر این، در بررسی اثر دمای خشک کردن و ضخامت کف روی پارامتر زاویه هیو، مشخص شد که میزان این پارامتر در هر دو ضخامت 3 و 5 میلی‌متر، در دمای 60 درجه سانتی‌گراد بیشتر از دماهای 45 و 75 درجه سانتی‌گراد است. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش ضخامت مقدار پارامتر زاویه هیو کاهش پیدا کرده است. Hawlader و همکاران (2006) بیان کردند که پایین بودن مقدار پارامتر زاویه هیو نشان‌دهنده افزایش مقدار رنگ قهوه‌ای ناشی از واکنش‌های قهوه‌ای شدن است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به‌منظور بهینه‌سازی شرایط تولید کف ماهی کیلکا جهت خشک کردن به روش کف‌پوشی، از روش سطح پاسخ استفاده شد. در ادامه تأثیر دماهای مختلف خشک کردن بر ریز ساختار کف و ویژگی‌های کیفی پودر (رطوبت، فعّالیت آبی، ظرفیت جذب آب و رنگ) و مدل‌سازی سینتیک خشک کردن کف بهینه‌سازی شده بررسی گردید. شرایط بهینه جهت تولید کف، با کمترین دانسیته و کمترین حجم زهکشی برای سفیده تخم‌مرغ 3/67 (گرم در 100 گرم)، صمغ 0/28 (گرم در 100 گرم) و مدت زمان هم زدن 8/93

دقیقه در نظر گرفته شد. ضریب نفوذ موثر در دماهای 45 تا 75 درجه سانتی‌گراد در ضخامت‌های 3 و 5 میلی‌متر از کف به‌ترتیب در محدوده $7/266\times10^{-8}$ تا $7/404\times10^{-8}$ و $1/310\times10^{-7}$ تا $1/693\times10^{-7}$ متر مربع بر ثانیه با میزان انرژی فعّال‌سازی 18/201 و 25/615 کیلوژول بر مول قرار داشت. نتایج حاصل از مدل‌سازی سینتیک خشک کردن نشان داد که در تمام حالت‌های خشک شدن کف بهینه از نظر دما و ضخامت، مدل ویبل با مقدار R^2 بالای 0/997 دارای بهترین برازش با داده‌های آزمایشگاهی بود. نتایج بیانگر کاهش فعّالیت آبی و رطوبت با افزایش دما است. همچنین با افزایش دمای خشک کردن، میزان قابلیت جذب آب پودرها افزایش پیدا کرد. میزان قهوه ای شدن محصول نیز در 2 دمای 45 و 75 درجه سانتی‌گراد نسبت به دمای 60 درجه سانتی‌گراد به‌ترتیب به دلیل زمان طولانی و دمای بالاتر فرایند خشک کردن بیشتر بود.

منابع

Akintoye, O. A. & Oguntunde, A. O.,1991, Preliminary investigation on the effect of foam stabilizers on the physical characteristics and reconstitution properties of foam-mat dried soy milk. *Drying Technology*, 9 (1),245–262.

Akpinar, E., Midilii, A. & Bicer, Y., 2003, Single layer drying behavior of potato slices in a convective cyclone dryer and mathematical modeling. *Energy Convection and Management*, 44, 1689-1705.

Alakali, J. S., Kucha, E. I. & Ariahu, C. C., 2010, drying characteristics of osmo-foam-mat mango pulp. *Journal of agriculture, Biotechnology & Ecology*, 3(1), 87-98.

Atarodi, M. R, 2014, Optimization of process parameters for spirulina platensis (*Spirulina platensis*) foam-mat drying. MSc thesis. Ferdowsi University of Mashhad.

Azizpour, M, 2012, Optimization of process parameters in foaming and evaluation of mass transfer kinetics in foam mat drying of shrimp (*Penaeus indicus*). MSc thesis. Ferdowsi University of Mashhad.

Baer, R. J., Wolkow, M. D. & Kasperson, K. M., 1997, Effect of emulsifiers on the body and texture of low fat ice cream. *Journal of Dairy Science*, 80, 3123–3132.

Bag, S. K., Srivastav, P. P. & Mishra, H. N., 2011, Optimization of process parameters for foaming of Bael (*Aegle marmelos* L.) fruit pulp. *Food and Bioprocess Technology*, 4 (8), 1450-1458.

Bikerman, J. J., 1973, *Foams*. New York, USA: Springer-Verlag.

Crank, J, 1975, *The Mathematics of Diffusion*. Oxford University Press, London.

Darvishi, H., Azadbakht, M., Rezaeiasl, A. & Farhang, A., 2013, Drying characteristics of sardine fish dried with microwave heating. *Journal of the Saudi society of agricultural sciences*, 12 (2), 121–127.

Deman, J. M., 1999, *Principles of food chemistry*. 3rd ed. Springer. New York.

Eduardo, J. V., Pardes, G. E., Beristain, C. I. & Tehuitzil, H. R., 2001, Effect of foaming agents on the stability, rheological properties, drying kinetics and flavour retention of tamarind foam mats. *Food Research International*, 34 (4), 587–598.

Fazaeli, M., Emam-Djomeh, Z., Kalbasi Ashtari, A. & Omid, M., 2012, Effect of spray drying conditions and feed composition on the physical properties of black mulberry juice powder. *Food and Bioproducts Processing*, 90, 667–675.

Fazli, H., Zhang, C. I., Hay, D. E. & Lee, C. W., 2009, Stock assessment and management implications of anchovy kilka (*Clupeonella engrauliformis*) in Iranian waters of the Caspian Sea. *Fisheries Research*, 100, 103–108.

Fennema, O. R., 1996. *Food Chemistry*. 3rded. Marcel Dekker. New York.

Ferrari, C. C., Germer, S. P. M. & de Aguirre, J. M., 2012, Effects of spray-drying conditions on the physicochemical properties of blackberry powder. *Drying Technology*: *An International Journal*, 30(2), 154-163.

Franco, T. S., Perussello, C. A., Ellendersen, L. N. & Masson, M. L., 2016, Effects of foam mat drying on physicochemical and microstructural properties of yacon juice powder. *LWT- Food Science and Technology, 66*, 503–513.

Hawlader, M. N. A., Perera, C. O. & Tian, M., 2006, Properties of modified atmosphere heat pump dried foods. *Journal of Food Engineering*, 74, 392-401.

Izadi, T, 2014, Survey on WPC (Whey Protein Concentrate) function in formation and stability of cheese foam and optimization of cheese powder production using foam mat drying. MSc thesis. Ferdowsi University of Mashhad.

Jaya, S. & Das, H., 2004, Effect of maltodextrin, glycerol monostearate and tri calcium phosphate on vacuum dried mango powder properties. *Journal of Food Engineering*, 63, 125–134.

Kadam, D. M. & Balasubramanuan, S., 2011, Foam-mat drying of tomato juice. *Food Processing and Preservation*, 35 (4), 488-495.

Kadam, D. M., Patil, R. T. & Kaushik, P., 2010, Foam mat drying of fruit and vegetable products, in drying of foods, vegetables and fruits - Volume (1), Ed. Jangam, S.V., Law, C.L., and Mujumdar, A.S. Published in Singapore, pp, 111-124.

Karim, A. A. & Wai, C. C., 1999. Characteristics of foam prepared from starfruit (*Averrhoa carambola* L.) puree by

using methyl cellulose. *Food Hydrocolloids*, 13, 203-210.

Kaur, S., Sarkar, B. C., Sharam, H. K. & Singh, C., 2009, Optimization of enzymatic hydrolysis pretreatment conditions for enhanced juice recovery from guava fruit using response surface methodology. *Food and Bioprocess Technology*, 2, 96–100.

Kolawole, O. F. & Okocha, O. J., 2010, Foam-mat drying of plantain and cooking banana (*Musa* spp.). *Food Bioprocess Technology*, *5*(4), 1173- 1180.

Lopez, A., Iguaz, A., Esnoz, A. & Virseda, P., 2000, Thin-layer drying behaviour of vegetable waste from wholesale market. *Drying Technology*, 18, 995–1006.

Mandala, I., Anagnostaras, E. & Oikonomou, C., 2005, Influence of osmotic dehydration conditions on apple air-drying kinetics and their quality characteristics. *Journal of Food Engineering*, 69(3), 307-316.

Moini, S. & Javaheri, M., 2004, An Investigation on Usage of Osmotic Method for Drying Kilka, *Iranian journal of agricultural sciences*, 35(4), 901-909.

Morgan, A. I., Graham, R. P., Ginnette, L. F. & Williams, G.S., 1961, Recent developments in foam mat drying. *Journal of Food Technology*, *15, 37-39*.

Papalamprou, E. M., Makri, E. A., Kiosseoglou, V. D. & Doxastakis, G. I., 2005, Effect of medium molecular weight xanthan gum in rheology and stability of oil in-water emulsion stabilized with legume proteins. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85(12), 1967-1973.

Paseban, A, 2012, Optimization of process parameters for foam mat drying of mushroom (*Agaricus bisporus*) puree. MSc thesis. Ferdowsi University of Mashhad.

Pirestani, S., Sahari, M. A., Barzegar, M. & Nikoopour, H., 2010, Lipid, cholesterol and fatty acid profile of some commercially important fish species from south Caspian Sea. *Journal of Food Biochemistry*, 34, 886–895.

Pourmahdi, A, 2013, Optimization of potato-powder production using foam mat method. MSc thesis. Islamic Azad University, Mazandaran Science and Research Branch.

Prins, A., 1988, *Principles of Foam Stability*. Advances in food emulsions and foams. In: E. Dickinson and G. Stainsby (Eds), Elsevier Applied Science. Barking, UK, 91-122.

Raghunath, M, R., Sankar, T. V., Ammu, K. & Devadasan, K., 1995, Biochemical and nutritional changes in fish proteins during drying. *Journal science food agriculture*, 67 (2), 197-204.

Raharitsifa, N., Genovese, D. B. & Ratti, C., 2006, Characterization of apple juice foams for foam-mat drying prepared with egg white protein and methylcellulose. *Journal of Food Science*, 71(3), 142–151.

Rajkumar, P., Kailappan, R., Viswanathan, R., Raghavan, G. S. V. and Ratti, C., 2007, Foam mat drying of alphonso mango pulp. *Drying Technology*, 25 (2), 357 – 365.

Salahi, M. R, 2015, Foam mat drying of cantaloupe (*Cucumis melo*) pulp: Optimization of foaming conditions and investigation of powder properties. MSc thesis. Ferdowsi University of Mashhad.

Thuwapanichayanan, R., Prachayawarakorn, S., Kunwisawa, J. & Soponronnarit, S., 2011, Determination of effective moisture diffusivity and assessment of quality attributes of banana slices during drying. *LWT-Food Science and Technology*, 44, 1502-1510.

Thuwapanichayanan, R., Somkiat, P. & Somchart, S., 2008, Modeling of diffusion with shrinkage and quality investigation of banana foam mat drying. *Journal of Drying Technology*, 26, 1326-1333.

Tonon, R. V., Baret, C. & Hubinger, M. D., 2008, Influence of process conditions on the physicochemical properties of acai (*Euterpe oleraceae* Mart.) powder produced by spray drying. *Journal of Food Engineering*, 88, 411–418.

Xiao, H. W. & Gao, Z. J., 2012, The Application of scanning electron microscope (SEM) to study the microstructure changes in the field of agricultural products drying**.** *Scanning Electron Microscopy*, Dr. Viacheslav Kazmiruk (Ed.), InTech**.**

Iranian Food Science and Technology Research Journal
Vol. 14, No. 4, Oct- Nov 2018, p.601-616

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
جلد 14، شماره 4، مهر- آبان 1397، ص. 616-601

Investigating the Parameters of the Process and Physical and Chemical Properties of Kilka Fish during Foam Mat Drying

F. Hasanzadeh Rad[1], F. Shahidi[2], M. Mohebbi[2]*, M. R. Salahi[3]

Received: 2017.02.21
Accepted: 2018.01.10

Introduction: Kilka Fish is one of the most popular seafood products available for aquaculture development. It is a rich source of proteins, vitamins and minerals such as calcium and phosphor. The highly perishable nature of Kilka fish has strongly attracted researchers to find new methods to extend its shelf life. Kilka fish powder can be used in many foods, such as soups, sauces, snacks, etc. Foam-mat drying is a new effective technique has recently gained much attention because it does not suffer from major problems associated with traditional dehydration methods, such as poor rehydration characteristics, unfavorable sensory profile, and long drying time. The main objectives of this study were: (1) to optimize the effective parameters (egg white powder and xanthan gum concentration, and whipping time) on foaming properties of Kilka fish; (2) to study the effects of drying temperature and foam thickness on the drying characteristics and select a suitable model for thin-layer drying of foam; (3) to compute effective moisture diffusivity and activation energy of foam during drying; and (4) to study the effects of drying conditions on moisture content, water activity, hygroscopicity and color of powders and microstructure of dried Kilka fish foams.

Materials and method: Fresh Kilka fish (C. *delicatula*) was obtained from the Pak Samar Miroud Company (Mazandaran, Iran). Xanthan gum and egg white powders were purchased from Sigma Chemical Company and Gol Powder Company (Golestan Province, Iran) respectively. The Kilka fish skin removed and cleaned, and then crushed using a kitchen blender to obtain a homogeneous and uniform mixture. Based on preliminary tests, xanthan gum solution was prepared by dissolving a suitable amount of the selected gum powder in distilled water and mixed with a magnetic stirrer to obtain a uniform solution. The resulted solution was cooled at 4°C for 18–24h to complete hydration. According to the experimental design, to prepare 100 g of samples, appropriate amount of fish, egg white powder, xanthan gum solution and distilled water were mixed a 250-mL beaker. The mixture was then whipped with a mixer (Gosonic, model No. GHM- 818, 250W, China) with maximum speed at ambient temperature during given time, which was recommended by Design-Expert software version 6.02 (Stat-Ease, Inc., Minneapolis, MN). Foaming conditions, namely amount of egg white powder, xanthan gum and whipping time, optimized using response surface methodology (RSM) for minimizing foam density (FD) and drainage volume (DV). To evaluate drying behavior of the optimized foam, drying was carried out in a batch-type thin-layer dryer at three drying temperatures (45, 60 and 75°C) on 3- and 5-mm thicknesses. Ten thin-layer drying models were evaluated in the kinetics research. The higher values of R^2 and lower values of χ^2 and RMSE were selected as the basis for goodness of fit. The effective moisture diffusivity was calculated using method of slopes. A Fick's diffusion model with slab geometry was used to describe the transport of moisture during drying inside a single Kilka fish foam mat. Activation energy was calculated by a simple Arrhenius-type relationship, by plotting the ln (D_{eff}) against the reciprocal of absolute temperature ($1/T$). The microstructure of the dried fish foam-mats was analyzed by a scanning electron microscope. Finally, the effects of drying conditions on physicochemical properties of fish powder including moisture content, water activity, hygroscopicity and color were investigated.

Results and Discussion: The optimum values of variables for best product quality in terms of minimum FD and DV corresponded to egg white powder 3.67 % (w/w), xanthan gum 0.28% (w/w) and whipping time 8.93 min. The amount of FD and DV for foam at these optimum conditions were 0.92 g/cm^3 and 0 ml, respectively. As expected, the increase in drying temperature and decrease in foam load led to acceleration of the dehydration of Kilka fish foam. Based on the statistical tests performed, Weibull distribution model can describe drying behavior of foams for all drying processes. Moreover, Fick's second law was employed to calculate the effective

1 and 2. and Former MSc Student, Professor and Ph.D Student, Department of food science & technology, Ferdowsi University of Mashhad (FUM), Mashhad, Iran
(Corresponding Author Email: mohebbatm@gmail.com)

moisture diffusivity that varied from 7.266×10^{-8} to 1.31×10^{-7} m^2/s and from 7.404×10^{-8} to 1.693×10^{-7} m^2/s with activation energy values of 18.201 and 25.615 kJ/mol for foam thicknesses of 3 and 5 mm, respectively. It was noted that the effective moisture diffusivity was increased when the drying temperature increased. Results showed that at the higher thickness, the internal moisture migration occurs along a longer distance rather than lower thickness. Therefore, an increase in moisture diffusivity occurs both with increase in drying temperature and sample thickness. The analysis of scanning electron microscopy (SEM) micrographs showed that there is wide porous structure of dried foams at higher speeds drying. With increasing drying temperature (due to reduction of drying times), combination of adjacent bubbles and therefor, collapse of foam structure occur less. Higher temperature reduced moisture content and a_w , and thickness rise increased moisture content and a_w under the same thickness and drying temperature, respectively. This is due to the fact that at higher temperatures, the rate of heat transfer to the sample would increase, therefore, it provides greater driving force for moisture evaporation which results the dried foams with reduced moisture content and a_w. Moreover, with increasing foam thickness due to increased drying times and probably collapsed structure of foams and therefor weak pore structure, drying was performed difficultly which causes to retain more water in dried foams. Drying conditions had significant effect on hygroscopicity of powders. Results of color investigation showed that in both thicknesses**,** powder produced at 60°C have higher L^* and lower a^*.

Keywords: Kilka fish, Foam mat drying, Foam properties, Moisture diffusivity coefficient, Physico-chemical properties of powder